

平原河网水流水质数值模拟研究展望

韩龙喜 陆 冬

(河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 论述了河网地区主要水量、水质模拟方法的基本理论、发展过程及其在生产实践中的应用状况,并从理论与应用角度分析了现今广为应用的水流、扩散质数值模拟方法的优缺点,同时在此基础上提出了改进数值模拟方法的设想。根据陆域特征研究适用于河网地区的面源污染负荷模型,根据交叉口扩散质输运特征研究河网水质精细模拟方法。

关键词 河网地区 水流 水质 数值模拟

中图分类号 X522 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)02-0127-04

河网地区是我国社会、经济、文化较发达的地区,但十分突出的水资源问题不仅使其成为水质型缺水地区^[1,2],而且制约着该地区社会、经济的发展。为此,人们不仅日益重视该地区水资源保护的研究,同时还采取相应的水流、水质模拟方法对其进行环境规划和管理。但由于理论、技术及各种客观条件的制约,目前水流,特别是水质数值模拟精度不十分令人满意。为了克服河网地区扩散质模拟方法存在的理论缺陷并提高模拟精度,本文在综合分析河网地区各类研究方法的基础上对河网水力水质模拟研究方向提出了设想。

1 研究进展

1.1 河网地区水流模拟

河网地区水流数值模拟方法可分为 2 类:第 1 类为常用的一维圣维南方程组数值解法;第 2 类为组合单元解法。其中,第 1 类解法又可分为直接解法和间接解法 2 种。Williams 及 Nosedá 提出了一种将计算断面交替取为水位和流量断面后对河网在所有计算断面上统一对一维圣维南方程组进行差分离散并求解的直接解法,但该方法未知数较多,在河网规模较大的情况下,由于河道的交叉衔接,所形成的矩阵是一个不规则、不对称的大型稀疏矩阵。为提高计算效率,需缩小矩阵规模。为此,李岳生等^[3]提出了河网非恒定流隐式方程组稀疏矩阵解法,该方法能有效地节省存储空间并提高计算速度,但矩阵中需包含所有断面的未知数,方程规模仍然较大,实际应用受到限制。而间接解法是将断面未知数集中于交叉点,待求出交叉点未知数后再求解各单一河道的未知变量,计算效率较高。间接解法的思想首先由荷兰水力学专家 Dronkers 于 1976 年提出,有关专家据此思想提出了河网非恒定流的三级解法^[4]和四级解法^[5]。此类间接解法中,三级解法最为常用。其求解思路为:(a)先将单一河道划分为若干子河段,在计算断面上对一维 Saint-Venant 方程组进行有限差分运算,求得各单一河道差分方程组,然后进行消元计算,求得单一河道首、末断面间流量与水位的相互关系;(b)根据河道交叉点水量守恒方程得到交叉点水位方程组,求解该方程组得到所有交叉点水位;(c)根据交叉点水位返回各单一河道,求得各计算断面水位、流量值。

组合单元解法^[6]由法国水力学专家 Jean 于 1975 年提出。我国也有研究者采用此方法进行河网地区水力模拟的^[7,8]。该方法的基本思想是:将河网地区水力特性相似、水位变幅不大的水体概化成单元,取单元中心的水位为代表水位,采用谢才公式模拟单元间流量交换,根据水量守恒建立每一单元微分形式的水量守恒方程,离散并得到以单元水位为自变量的代数方程,辅以边界条件即可求得各单元水位和单元间流量。

上述 2 类方法中,组合单元解法对河道进行简单概化,以单元为计算单位,计算相对简单,但模拟精度较低,仅适用于大尺度水域的水力模拟,而圣维南方程组数值解法可以精确计算每一条河道的水流状况,所以

成为河网水力模拟的主流方法,其中三级联解法最为常用^[9~12]。当采用三级解法模拟长系列大范围河网水流特性时,需对河道进行概化处理,即将等级较小的河道概化为一条概化河道,要求该概化河道与被概化河道的过流能力、调蓄量相当。同时,为考虑降雨对河网水力特性的影响,还必须对河道包围的陆域面积进行产汇流计算,将产流量以包围陆域的河道长度为权重分配到周围河道^[13]。由于三级解法以单一河道为模拟对象,同时还考虑了降雨等的影响,因此其计算精度较高。

1.2 河网地区水质模拟

与河网水流模拟相似,按水质控制方程及河道概化方式,河网地区水质模拟方法可分为2类:第1类为常用的一维纵向分散方程求解法,第2类为组合单元法。有关文献^{①[14]}在河网三级解法水流模型的基础上采用三级解法模拟河网内污染物质的输运。其求解思路与水流模型类似,即(a)对每条河道的扩散质一维对流纵向分散方程进行有限差分离散,经消元计算得到各单一河道出流断面质量浓度与入流断面质量浓度间的线性关系;(b)在交叉口引入均匀混合假设——流出交叉口的断面质量浓度等于流入交叉口各断面质量浓度的平均值,导得以各交叉口节点质量浓度为未知变量的方程组,求解得各交叉口质量浓度;(c)返回单一河道计算各断面质量浓度。此方法被广泛应用于河网地区环境模拟和环境规划研究中^{②[15]},并已成为河网地区水质计算的主流方法。

在组合单元解法水力模型的基础上,文献^[16~18]提出水质模拟的组合单元解法,完成了与水流模型的匹配。该方法将水流、水质特性相近的若干条河道作为一个贮水、贮质单元,建立反映各单元间污染物输运的数学模型,以模拟单元间的扩散质交换及单元质量浓度的时间变化过程。由于单元概化使精度受损,因此该方法仅适用于大尺度水环境规划,目前未被广泛应用于生产实践。

采用三级解法模拟河网地区水质状况,污染源是重要的输入条件,污染源源强准确性是影响模拟精度的一个重要因素。对污染源而言,点源由于有固定排放口位置及污染物排放量监测资料,因而点源源强较为准确,建立水质模型时,污染源直接进入排放口相应的子河段,而面源是由河道包围的陆域面积产生的,它与下垫面、降雨等因素有关^[19~21],且具有源强时间变化大、空间分布不均匀的特点,通常采用经验常数估算被河网包围的陆域面积产生的面源总污染负荷量,然后在空间上按包围陆域的河道长度在年内按时间均匀分配^{③④}。文献^[22]对河网地区陆域面污染源进入河道的负荷量估算方法做了研究,提出了考虑河道空间分布形状对受纳面污染源负荷影响的子河段面源源强计算公式。

2 存在问题及改进思路

目前,无论是水力模拟还是水质模拟,都基本上能满足水利、航运、环保等生产实践的需要。但就模拟精度而言,通常情况下水质模拟精度要低于水流模拟精度^①。河网地区,精度较低的水质模拟,一方面会降低模拟结果的可信度,制约模型本身的应用,另一方面会影响河网地区环境规划、环境管理研究。精度偏低的原因有多种,除了污染源资料误差、水化学动力特性复杂、水流模拟结果存在偏差等因素外,模拟方法本身采用的假设所带来的系统误差也是一个重要因素。

2.1 河道概化

大型复杂河网,水系十分复杂,河道数量众多,河道规模、过水流量等相差较大,若将大小不一的所有河道作为单一河道参与计算,工作量会很大,甚至无法满足计算机硬件及运算时间的要求。为节省工作量,必须对规模较小的河道进行概化处理。概化处理总的原则是:概化后的河道在不同水位下的流量、河道调蓄量与被概化河道的相等。目前,在对河道进行概化时主要考虑了水流条件对概化的要求,而对水质要求未能全面考虑。因为,被概化的若干河道水环境质量、纳污量可能存在较大差异,它们被概化成一条河道后,无论是纳污量还是客水水质,都被平均化处理了,这种处理忽略了不同河道的水质差异,当被概化河道水质特征、纳污量悬殊较大时,模拟结果难以反映具体河道的实际情况。而且,由于被概化河道水质模拟的偏差,还会造成概

① CHU Jun-da, et al. Unsteady water quality model with multi-parameter for river networks. Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics. Hong Kong, 1991.

② 河海大学环境水利研究所. 典型河网水环境决策支持系统研究. 2002.

③ 河海大学, 荷兰 Delft 水力学研究所. 太湖流域河网水质模型研究. 1997.

④ 荷兰 Delft 水力学研究所, 河海大学环境水利研究所. 太湖三年水质研究. 1996.

化河道下游的模拟偏差.为了有效地避免因概化河道产生的误差,一方面应尽量减少被概化河道的数量;另一方面,在选择概化河道组合时,不但应满足水力要求,而且应尽量使得被概化河道的水环境功能、水质类别、水质状况等水环境特征相近.

2.2 子河段纳污量模拟

污染源源强是水质模拟的重要输入条件.点源,由于其排放口位置明确,故源强便于监测.研究资料表明,面源是河网地区产生水体富营养化的重要因素.但由于面源污染物产生量及进入水体的过程较为复杂,其定量计算方法不十分成熟.文献[19~21]研究了小流域面污染源污染负荷随降雨的产生过程,取得了系列成果.但对于河网地区,由于产流过程及下垫面因素十分复杂,现今的河网水质模拟方法对面污染源进入计算

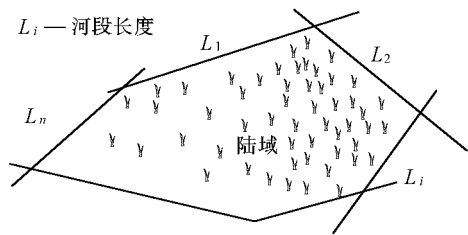


图 1 陆域与河道的关系

Fig.1 Relationship between land area and sub-channels

算河段的负荷量及时间分配过程做了很多简化.有关文献^①根据河道所包围的陆域面积的大小、陆域下垫面特征及生物量大小,采用生物量-产污量当量法估算年总产生量,然后在年内按时间均匀分配,再以子河段长度 $L_i / \sum_i L_i$ (见图 1) 为权重,分配到每个子河段.显然,该方法既没有考虑面源空间分布的不均匀性,也没有考虑时间分布的不均匀性.实际上,面源主要产生于降水期,特别是初期雨水污染物质量浓度很高,而在数值模拟时,采取时间均匀概化,坦化了降水期面源源强.文献[22]在计算包围陆域各子河段接纳污染源源强时,考虑了陆域形状及面

源空间分布的不均匀性,但对面源的时间分配仍采用均匀化处理方法,没有从根本上解决问题.

由于河网地区特别是大型河网地区,面污染源对水质的影响十分显著,其时空分布是必须研究的重要问题.为从源头上减小模拟误差,应进一步研究河网地区陆域各种下垫面下的产流规律、各种下垫面产污量的计算方法、不同下垫面产污与产流的相互关系、子河段包围的陆域形状对子河段接纳产污量分配的影响及面源污染负荷随降水变化的时间分配关系.

2.3 河道内水质模拟

单一河道,其河道长度基本上可保证污染物质在进入交叉口前达到断面内的均匀混合,因此可采用一维模式模拟河段内断面平均质量浓度的时空变化.但交叉口水流、水质特征则较为复杂.如图 2 所示, Q_{in_1}, Q_{in_2} 为交叉口入流河道的流量, C_{in_1}, C_{in_2} 为相应河道污染物的质量浓度; Q_{out_1}, Q_{out_2} 为交叉口出流河道的流量, C_{out_1}, C_{out_2} 为相应的出流质量浓度.均匀混合假设认为:流入交叉口水体中的污染物在交叉口充分混合,水质达到均匀状态,均匀混合后的质量浓度定义为交叉口质量浓度,即 $C_{out_i} = \sum_i (Q_{in_i} C_{in_i}) / \sum_i Q_{in_i}$.理论上,此假设有特定适用范围——交叉口河道为一进多出或多进一出.但交叉口河道常出现多进多出的情况,如图 2 所示.这种情况下,由于交叉口流程较短,横

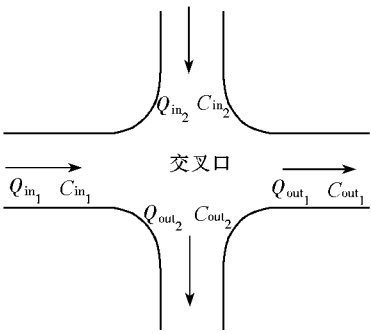


图 2 交叉点污染物混合输运示意图

Fig.2 Pollutant transport through intersection

向混合很不充分,因此很难达到均匀混合^[23].河网三级解法水质模型采用交叉口扩散质均匀混合假设模拟交叉口的污染物对流输运,必然会产生系统误差.为弥补上述缺陷,应舍弃交叉口扩散质均匀混合假设,从扩散质输运机理出发,分析研究不同水流条件下污染物在交叉口的输运规律,建立流出交叉口断面的平均质量浓度与流入交叉口断面的平均质量浓度间的响应关系,并研制与之相匹配的河网水质模型.

3 结 论

目前,河网地区面源产污时间过程过于简化,河网交叉口水流及污染物输运缺乏系统研究,水质模拟方法存在较大系统偏差.为进一步完善河网地区水质模拟方法,可在研究污染物产生、输运规律的基础上研究并提出更为精细的水质模拟方法.具体可进行如下几方面的研究:

① 河海大学环境水利研究所.典型河网水环境决策支持系统研究.2002.

- a. 根据陆域特征,研究并提出适用于河网地区不同下垫面的面污染源污染负荷产生模型.
- b. 研究交叉口水动力特征、污染物运输规律,为河网水质精细模拟提供理论依据.
- c. 研究基于陆域面源产污过程、交叉口非均匀混合的河网水质模拟方法,开发研制精细河网水质数学模型,为水环境管理提供更为精细的模拟工具.

参考文献:

- [1] 杨存信,崔广柏.城市水资源与水环境保护[M].南京:河海大学出版社,1996.112—113.
- [2] 周年生,李彦东.流域环境管理规划方法与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2000.1—3.
- [3] 李岳生.河网非恒定流隐式方程组稀疏矩阵解法[J].中山大学学报(自然科学版),1979(1):21—26.
- [4] 张二骏,张东生,李挺.河网非恒定流的三级联合解法[J].华东水利学院学报,1982,10(1):1—13.
- [5] 吴寿红.河网非恒定流四级解法[J].水利学报,1985(8):42—50.
- [6] CUNGE J A. Unsteady flow in open channel[M]. New York: Water Resources Publications, 1975. 705—761.
- [7] 金忠青.平原河网水量计算及参数率定[J].水动力学研究与进展(A辑),1991(增刊):39—45.
- [8] 韩龙喜,张书农.复杂河网非恒定流计算模型——单元划分法[J].水利学报,1994(2):52—56.
- [9] AKAN A O, YEN B C. Diffusion wave flood routing in channel networks[J]. J Hydr Div, ASCE, 1981, 107(7):719—732.
- [10] CHOI G W, MOLINAS A. Simultaneous solution algorithm for channel network modeling[J]. Water Resour Res, 1993, 29(2):321—328.
- [11] JEFFCOAT H H, JENNINGS M E. Computation of unsteady flows in the Alabama River[J]. Water Resources Bulletin, 1987, 23(2):313—315.
- [12] NQUYEN Q K, KAWANO H. Simultaneous solution for flood routing in channel networks[J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1995, 121(10):744—750.
- [13] 韩龙喜,姚琪.南通水系水环境及污染综合治理研究[J].河海大学学报,1998,26(1):114—118.
- [14] 褚君达,徐惠慈.河网水质模型及其数值模拟[J].河海大学学报,1992,20(1):16—22.
- [15] 韩龙喜,朱党生.河网地区水环境规划中的污染源控制方法[J].水利学报,2001(10):28—31.
- [16] 金忠青,韩龙喜.一种新的河网水质模型——组合单元水质模型[J].水科学进展,1998,9(1):35—40.
- [17] 韩龙喜,蒋莉华,朱党生.组合单元水质模型中的边界条件及污染源项反问题[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(5):23—26.
- [18] 韩龙喜.河网地区水力水质特性的组合单元解法及反问题研究[D].南京:河海大学,1998.
- [19] YOUNG R A, ONSTAD C A, BOSCH D D. AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluation agricultural watershed[J]. Journal of Water and Soil Conservation, 1989, 44(2):169—173.
- [20] DENNIS L, CORWIN K L, TIMOTHY R E. GIS支持下的非点源污染模型[J].水土保持科技情报,1999(1):14—16.
- [21] 李怀恩,沈晋,刘玉生.流域非点源模型的建立与应用实例[J].环境科学学报,1997,17(2):141—147.
- [22] 韩龙喜,金忠青.三级联解法水力水质模型的糙率反演及面污染源计算[J].水利学报,1998(7):30—34.
- [23] 张书农.环境水力学[M].南京:河海大学出版社,1988.134—139.

Prospects of water quality numerical simulation for plain river network

HAN Long-xi, LU Dong

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: The basic theories on numerical simulation of water quantity and water quality for river network regions and their development and application to the fields of water resources harnessing, navigation, and water environment planning are summarized, and the advantages and disadvantages of the numerical simulation methods for water flow and diffusive substances currently used are analyzed from the angles of theory and application. Then, some suggestions for improvement of current simulation methods are made, i. e. to develop an area-source pollution model for river network regions according to the land characteristics, and to study a refined water quality model according to the transport features of diffusive substances through the intersection of river channels.

Key words: river network region; water flow; water quality; numerical simulation